

# Управление уровнем автоматизации при производстве роботов.

## Иерархическая схема. Часть 2

Н.И. Аристова

**Аннотация.** Рассмотрена иерархическая однопродуктовая модель производства роботов. Производится сравнение трех схем организации дискретного производства: ручное, с использованием роботов, изготовленных на другом заводе, и с использованием роботов, произведенных на данном предприятии (самовоспроизведение). При этом учитывается, что производство продукции на предприятии организовано с применением принципа иерархии, а все технологические операции выполняются правильно с вероятностью, меньшей единицы. Предложен алгоритм оптимального распределения работ между роботами и людьми по критерию минимизации участия человека в производственном процессе. Показано, что для достижения указанной цели и эффективного управления предприятием дискретного типа с обратной связью по готовой продукции, необходимо использовать стратегию самовоспроизведения.

**Ключевые слова:** самовоспроизведение, роботы, обратная связь по продукции, уровень автоматизации, единица рабочего времени робота, вероятность правильного выполнения.

### Введение

Целью любого современного промышленного предприятия является выпуск конкурентоспособной по функциональным и качественным характеристикам продукции. Для удовлетворения этим критериям разрабатываются различные научно-технические и бизнес-методики. Среди инновационных принципов, направленных на повышение конкурентоспособности выпускаемой продукции и предприятия в целом, выделим, например, технологию бережливого производства. Одной из задач бережливого производства является поиск оптимальной загрузки оборудования. На дискретных сборочных предприятиях работают люди и роботизированные комплекты. Поэтому для повышения экономической эффективности производства важно оптимально распределить работы между человеком и оборудованием. Будем рассматривать предприятия, характеризующиеся наличием обратной связи по готовой продукции.

В ходе технологического процесса и человек, и робот выполняют технологические операции правильно с некоторой вероятностью, отличной от единицы [1]. Применение принципа иерархии в технологическом процессе позволяет повысить вероятность правильного изготовления изделия, выпускаемого на предприятии. Действительно, на каждом уровне иерархии осуществляется контроль правильного выполнения технологических операций, на следующий уровень иерархии производственного процесса поступают только годные узлы.

### 1. Постановка задачи

На реальных промышленных предприятиях сборка готового изделия выполняется с применением принципа иерархии, т.е. из отдельных деталей изготавливаются узлы, затем из этих узлов собираются узлы следующего уровня иерархии и так далее, пока не будет собран узел последнего уровня иерархии, то есть изделие полностью. На каждом уровне иерархии со-

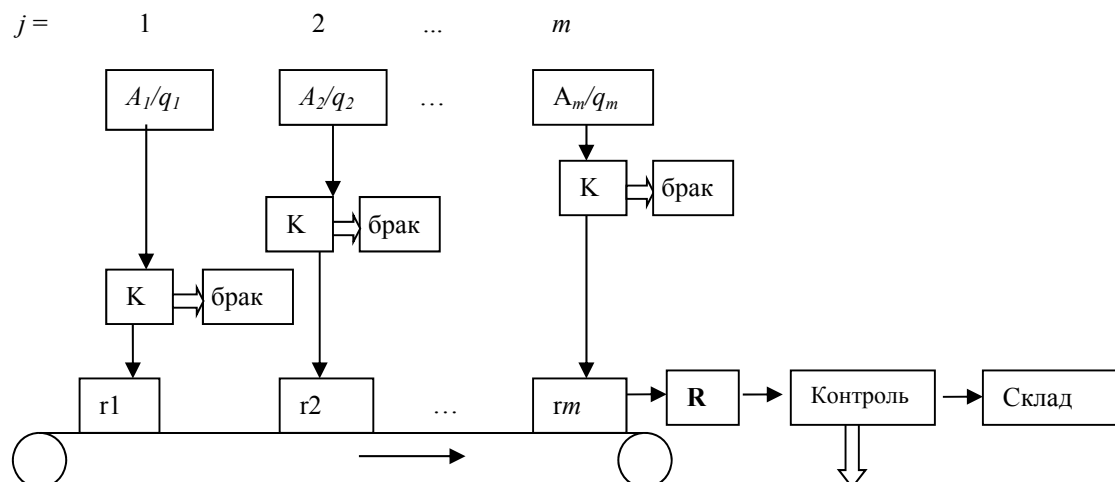


Рис. 1. Схема ручного изготовления робота

бранные узлы контролируются, бракованные узлы поступают в брак, годные переходят на следующий уровень иерархии. Будем считать, что контрольная операция выполняется правильно с вероятностью  $P=1$ , то есть контроль идеальный.

Ограничение на использование роботов во всех производственных технологических операциях, которые робот может выполнять, накладывает его конечный ресурс  $T$ . Отсюда возникает необходимость в наличии обратной связи по готовой продукции: робот со склада готовой продукции заменяет робота, выработавшего свой ресурс, на конвейере.

Робот может выполнять большинство технологических операций. Однако выполнение отдельных операций роботом может оказаться неэффективным из-за его ограниченного срока жизни и вероятностного выполнения технологических операций. Поэтому актуальной является задача определения оптимального распределения работ между человеком и роботом при иерархическом принципе производства продукции. Определение необходимой степени автоматизации  $\alpha$  проводится по критерию минимизации участия человека в производственном процессе.

## 2. Ручное изготовление

Рассмотрим предприятие по производству роботов, на котором все технологические операции выполняют люди. Сборка роботов орга-

низована с применением принципа иерархии. Все технологические операции выполняются правильно с вероятностью  $q$ , меньшей единицы. Контрольные операции выполняются идеально ( $qK=1$ ). Схема такого производства показана на Рис. 1.

Для изготовления робота на конвейере используется  $m$  видов технологических операций. Все операции выполняются человеком. Рабочий  $A_1$  выполняет сборку узла  $r_1$  из элементарных деталей на первом уровне иерархии, вероятность правильного выполнения одной технологической операции 1-го вида соответствует значению  $q_1$ .

Вероятность изготовления годного узла на первом уровне иерархии при статистической независимости всех технологических операций равна:

$$Q_1(\alpha = 0) = q_1^{n_1}.$$

Средние затраты труда человека на первом уровне иерархии равны:

$$A_1 = a_1 n_1 / q_1^{n_1},$$

где  $n_1$  - общее число операций, необходимое для изготовления узла на первом уровне иерархии,  $a_1$  - время, затрачиваемое человеком на выполнение операции на первом уровне иерархии,  $q_1$  - вероятность правильного выполнения операции человеком на первом уровне иерархии.

Узлы, собранные на первом уровне иерархии, поступают на второй уровень, где рабочий

A2 выполняет сборку узла с вероятностью правильной сборки  $q_2$  и т.д.

Средние затраты труда человека на втором уровне иерархии включают также затраты первого рабочего и равны:

$$A_2 = \frac{A_1 + a_2 n_2}{q_2^{n_2}} = \frac{a_1 n_1}{\prod_{i=1}^2 q_i^{n_i}} + \frac{a_2 n_2}{q_2^{n_2}},$$

где  $n_2$  - общее число операций 2-го вида, необходимое для изготовления узла на втором уровне иерархии,  $a_2$  - время, затрачиваемое человеком на выполнение операции 2-го вида на втором уровне иерархии,  $q_2$  - вероятность правильного выполнения операции 2-го вида человеком на втором уровне иерархии.

Средние затраты труда человека на третьем уровне иерархии равны:

$$A_3 = \frac{A_2 + a_3 n_3}{q_3^{n_3}} = \frac{\frac{A_1 + a_2 n_2}{q_2^{n_2}} + a_3 n_3}{q_3^{n_3}} =$$

$$= \frac{a_1 n_1}{\prod_{i=1}^3 q_i^{n_i}} + \frac{a_2 n_2}{\prod_{i=2}^3 q_i^{n_i}} + \frac{a_3 n_3}{\prod_{j=1}^3 q_j^{n_j}}.$$

Распространяя приведенные выше рассуждения на все  $k$  уровней иерархии, получим уравнение, определяющее стоимость робота ручного изготовления при иерархической схеме производства:

$$\Phi_1(0) = \sum_{i=1}^k \frac{a_i n_i}{\prod_{l=i}^k q_l^{n_l}}.$$

Стоимость единицы рабочего времени робота зависит от времени его жизни и вероятности правильного выполнения технологических операций и для ручного иерархического производства принимает вид:

$$\lambda_1(0) = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^k \frac{a_i n_i}{\prod_{l=i}^k q_l^{n_l}}.$$

### 3. Использование роботов, изготовленных вне предприятия

Рассмотрим далее предприятие, на котором часть операций выполняет человек, а часть операций автоматизирована. Для автоматизации некоторых операций на данном заводе используются роботы, поступившие с другого производства, где автоматизация отсутствует.

В схеме, показанной на Рис. 2, теоретически каждую технологическую операцию может выполнить или робот, или человек. Задача состоит в том, чтобы распределить выполнение технологических операций между роботами и людьми таким образом, чтобы стоимость изготовленного робота была минимальна.

Средние затраты труда человека на первом уровне иерархии равны:

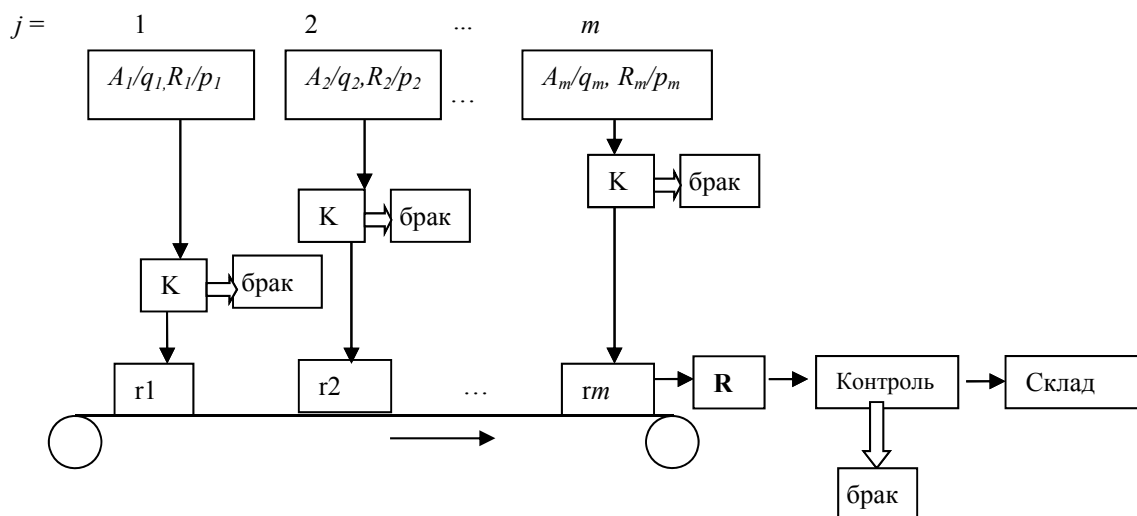


Рис. 2. Схема производства при использовании «чужих» роботов

$$A_1 = \frac{(1 - \alpha_1)a_1n_1 + \alpha_1n_1\lambda_1(0)b_1}{q_1^{(1-\alpha_1)n_1} p_1^{\alpha_1n_1}}.$$

Первая сумма описывает прямые затраты труда человека на производство данного робота, вторая сумма – косвенные затраты труда человека при производстве узла на первом уровне иерархии. Здесь  $b_1$  – затраты времени робота на выполнение операций на первом уровне иерархии,  $p_j$  – вероятность правильного выполнения операции  $j$ -го вида роботом.

Средние затраты труда человека на втором уровне иерархии равны:

$$\begin{aligned} A_2 &= \frac{A_1 + ((1 - \alpha_2)a_2n_2 + \alpha_2n_2\lambda_1(0)b_2)}{p_2^{\alpha_2n_2} q_2^{(1-\alpha_2)n_2}} = \\ &= \frac{(1 - \alpha_1)a_1n_1 + \alpha_1n_1\lambda_1(0)b_1}{\prod_{i=1}^2 p_i^{\alpha_i n_i} q_i^{(1-\alpha_i)n_i}} + \\ &+ \frac{(1 - \alpha_2)a_2n_2 + \alpha_2n_2\lambda_1(0)b_2}{p_2^{\alpha_2n_2} q_2^{(1-\alpha_2)n_2}}. \end{aligned}$$

Распространяя приведенные выше рассуждения на все  $k$  уровней иерархии, получим уравнение, определяющее стоимость робота при изготовлении его с использованием ручного труда и труда робота, изготовленного на неавтоматизированном предприятии:

$$\Phi_2(\alpha) = \sum_{i=1}^k \frac{(1 - \alpha_i)a_i n_i + \alpha_i n_i \lambda_1(0)b_i}{\prod_{l=i}^k p_l^{\alpha_l n_l} q_l^{(1-\alpha_l)n_l}}. \quad (1)$$

Стоимость единицы рабочего времени робота зависит от времени его жизни. Ресурс изготовленного робота будет равен исходному времени жизни  $T$ , поскольку робот никаких операций не выполнял. Тогда стоимость единицы рабочего времени робота при использовании на заводе труда человека и роботов с другого предприятия принимает вид:

$$\lambda_2(\alpha) = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^k \frac{(1 - \alpha_i)a_i n_i + \alpha_i n_i \lambda_1(0)b_i}{\prod_{l=i}^k p_l^{\alpha_l n_l} q_l^{(1-\alpha_l)n_l}}.$$

#### 4. Изготовление с самовоспроизведением

Рассмотрим далее предприятие, на котором часть операций выполняет человек, а часть операций автоматизирована. Для автоматизации некоторых операций используются роботы, произведенные на данном заводе. При этом и роботы, и человек выполняют технологические операции с некоторой вероятностью правильного выполнения. Используется иерархическая схема сборки роботов (Рис. 3).

Формула (1) определяет стоимость робота при его изготовлении с помощью роботов стороннего производства, стоимость единицы рабочего времени которых равна  $\lambda_1$ . При использовании сторонних роботов в (1) подставляется значение  $\lambda_1(0)$ , а при использовании сделанных на заводе –  $\lambda_2(\alpha)$ .

Средняя стоимость годных роботов, изготовленных с использованием роботов собственного производства и с применением принципа иерархии, будет равна:

$$\Phi_3(\alpha) = \sum_{i=1}^k \frac{(1 - \alpha_i)a_i n_i + \alpha_i n_i \lambda_2(0)b_i}{\prod_{l=i}^k p_l^{\alpha_l n_l} q_l^{(1-\alpha_l)n_l}}. \quad (2)$$

Соответственно стоимость единицы рабочего времени робота будет равна:

$$\lambda_3(\alpha) = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^k \frac{(1 - \alpha_i)a_i n_i + \alpha_i n_i \lambda_2(0)b_i}{\prod_{l=i}^k p_l^{\alpha_l n_l} q_l^{(1-\alpha_l)n_l}}.$$

Для решения задачи оптимального распределения работ между роботами и людьми требуется найти такой вектор автоматизации  $\alpha_{\text{опт}}$ , который минимизирует (2). Как показано в [2], компонентами оптимального вектора  $\alpha_{\text{опт}}$  могут быть только 0 и 1. Размерность вектора  $\alpha$  – это число видов технологических операций  $m$ .

#### 5. Пример

Пусть для изготовления промышленного робота используется четыре вида технологических операций. Первую операцию робот выполнять не может. Остальные три операции могут выполняться и роботом, и человеком.

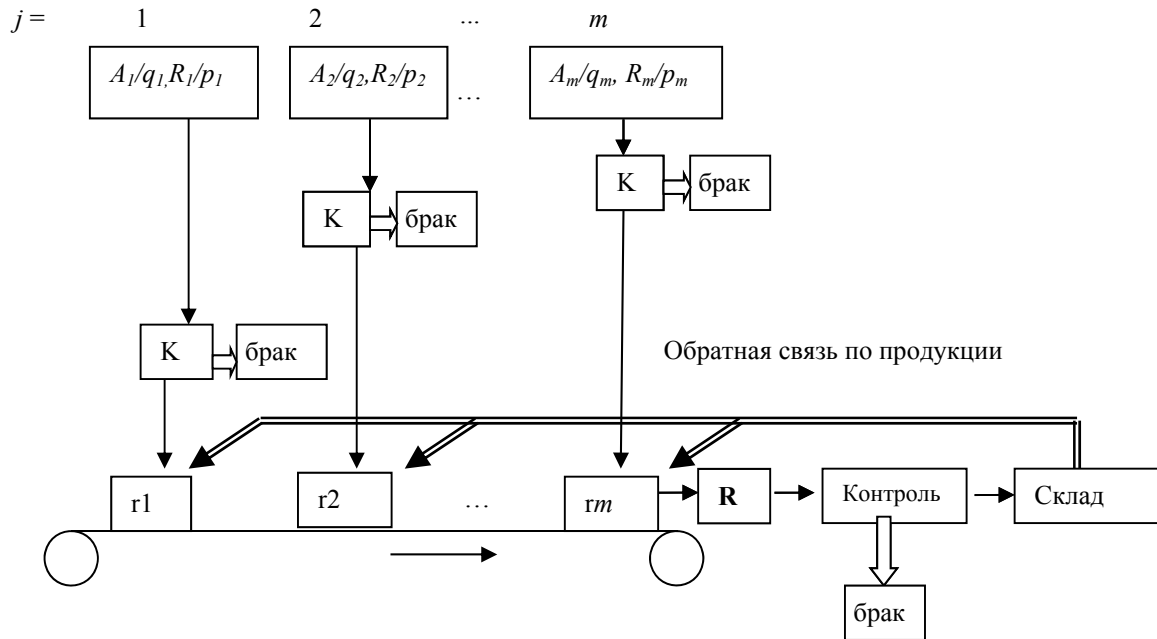


Рис. 3. Схема производства при использовании схемы самовоспроизведения

Ресурс изготовленного робота обозначим через  $T=500$ .

В Табл. 1 заданы временные значения выполнения четырех видов технологических операций роботом и человеком, вероятности их правильного выполнения, а также число одинаковых технологических операций, каждого вида.

Используя данные из Табл. 1, определим стоимость робота, изготовленного вручную:

$$\Phi_1(0) = \frac{\sum_{j=1}^m a_j n_j}{\prod_{j=1}^m q_j^{n_j}} = 208.$$

Табл. 1

| Вид технологической операции $j$ | Время выполнения операции человеком $a_j$ | Время выполнения операции роботом $b_j$ | Вероятность правильного выполнения операции человеком $q_j$ | Вероятность правильного выполнения операции роботом $p_j$ | Число одинаковых операций $n_j$ |
|----------------------------------|-------------------------------------------|-----------------------------------------|-------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|---------------------------------|
| 1                                | 1                                         | 11                                      | 0,99                                                        | 0,99                                                      | 10                              |
| 2                                | 2                                         | 3                                       | 0,99                                                        | 0,98                                                      | 10                              |
| 3                                | 5                                         | 3                                       | 0,98                                                        | 0,98                                                      | 15                              |
| 4                                | 4                                         | 100                                     | 0,99                                                        | 0,99                                                      | 10                              |

Табл. 2

| Вектор автоматизации               | $\alpha(0000)$ | $\alpha(0001)$ | $\alpha(0010)$ | $\alpha(0011)$ | $\alpha(0100)$ | $\alpha(0101)$ | $\alpha(0110)$ | $\alpha(0111)$ |
|------------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| $\Phi_2$ (без самовоспроизведения) | 208            | 273            | 199            | 272            | 123            | 189            | 115            | 272            |
| $\Phi_3$ (с самовоспроизведением)  | 208            | 236            | 189            | 220            | 111            | 139            | 93             | 220            |

Стоимость единицы рабочего времени робота будет равна

$$\lambda_1(0) = \frac{\Phi_1(0)}{T} = 0,416.$$

Результаты расчетов по формулам (1) и (2) для различных вариантов автоматизации сведены в Табл. 2.

На Рис. 4 показана зависимость стоимости робота от разных схем автоматизации. В первой позиции – стоимость робота при ручном изготовлении, когда вектор автоматизации  $\alpha(0000)$  содержит только нули. В остальных позициях вектор автоматизации принимает последовательно все значения от 0001 до 0111 (первую

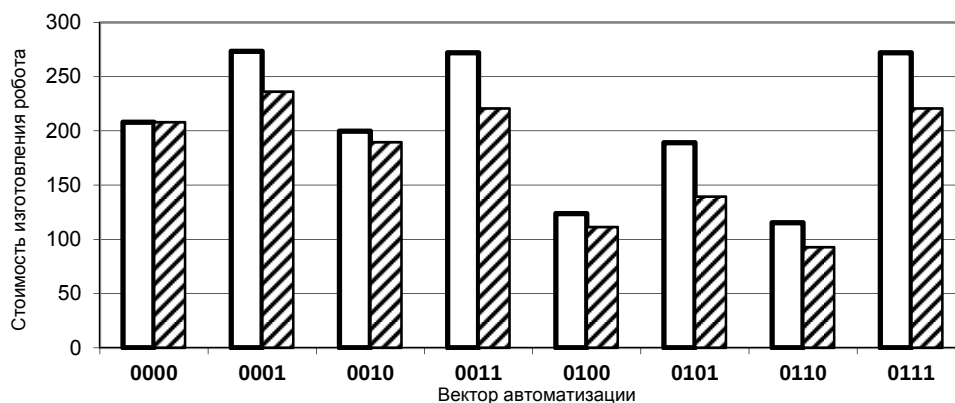


Рис. 4. Стоимость роботов при разных уровнях автоматизации с использованием самовоспроизведения (заштрихованный), без использования самовоспроизведения (белый)

операцию робот выполнять не может, и там всегда будет ноль).

Как видно из Рис. 4, минимальная стоимость без самовоспроизведения достигается при значении вектора автоматизации 0100. При этом стоимость робота уменьшается от 208 до 115, то есть почти в два раза. Использование эффекта самовоспроизведения позволяет еще более снизить стоимость робота до 93 при значении вектора автоматизации 0110.

Отметим также, что автоматизация какой-либо технологической операции сама по себе может и не снизить стоимость изготавливаемого робота. Например, на рисунке, когда вектор автоматизации равен  $\alpha(0001)$ ,  $\alpha(0010)$  и  $\alpha(0011)$ , стоимость робота, изготовленного с/без использования эффекта самовоспроизведения, даже возрастает по сравнению с ручной сборкой.

## Заключение

Таким образом, проанализированы особенности функционирования иерархического дискретного производства, в котором технологические операции выполняют люди и роботы. Выполнение технологических операций характеризуется вероятностью правильного выполнения, меньшей единицы. Роботы характеризуются ограниченным жизненным ресурсом.

Основные выводы.

1. Выполнение всех технологических операций только роботом в большинстве случаев

не позволяет достичь максимального эффекта от автоматизации, так как любой робототехнический комплекс имеет ограниченный ресурс и выполняет технологические операции правильно с вероятностью, меньшей единицы.

2. Для достижения оптимального уровня автоматизации необходимо проводить расчеты и определять компоненты вектора автоматизации, позволяющие минимизировать затраты труда человека в производственном процессе.

3. Применение принципа иерархии в технологическом процессе позволяет повысить вероятность правильного изготовления изделия, выпускаемого на предприятии.

Наибольшего эффекта от автоматизации технологических операций, выполняемых правильно с вероятностью, меньшей единицы, на предприятии с иерархическим принципом организации производства можно достичь при использовании схемы производства роботов с применением самовоспроизведения, то есть на предприятиях с обратной связью по продукции.

## Литература

1. Аристова Н.И. Управление уровнем автоматизации при производстве роботов. Вероятностная схема // Информационные технологии и вычислительные системы. 2014. №2.
2. Чадеев В.М. Управление использованием роботов для производства роботов // Автоматика и телемеханика. 1998. №12.

**Аристова Наталья Игоревна.** Старший научный сотрудник ИПУ им. В.А. Трапезникова РАН. Окончила МИФИ в 1995 году. Кандидат технических наук. Автор более 100 печатных работ и 1 монографии. Область научных интересов: промышленная автоматизация, робототехника. E-mail: avtprom@yandex.ru